

光源的特性对光纤环形腔 有效精细度的影响

胡宗福 钱景仁

(中国科技大学电子工程和信息科学系, 合肥 230026)

沈会明

(合肥工业大学计算机与信息系, 合肥 230009)

摘 要 讨论了光源的谱分布和线宽对无源光纤环形腔的有效精细度(线宽)的影响。对两种典型的谱分布[洛伦兹(Lorentz)和高斯(Gauss)], 光源给出了有效精细度(线宽)与入射光线宽之间的定量关系。分析表明:洛伦兹型光源对有效精细度(线宽)的影响比高斯型大,而且对洛伦兹型光源,有效线宽总是大于入射光的线宽。

关键词 光纤环形腔, 有效精细度(线宽)。

1 引 言

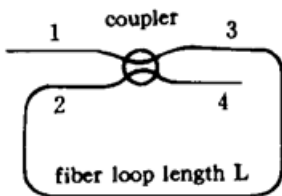
无源光纤环形腔(PFORR)有类似于法布里-珀罗腔的特性^[1],而且结构简单,不像法布里-珀罗腔对调整精度要求非常严格,无源光纤环形腔的腔长可以比法布里-珀罗腔长得多,可以获得极高的分辨本领。随着方向耦合器制作技术的不断提高,已能获得精细度高达 1260 的无源光纤环形腔^[2],当然这样的无源光纤环形腔具有极高的分辨本领。分辨率达 20 kHz 的光纤环形腔已被用来直接测量单频激光的线宽^[3]。无源光纤环形腔的带通特性还可以用来实现可调谐的光频移频器^[4]。光纤环形腔的精细度是由腔的损耗决定的,在腔内插入光放大器可以使环形腔的有效精细度提高。Haruo、Okamura 用掺 Er 光纤放大器获得了大于 500 的精细度^[5]。光纤环形腔极高的精细度使得它对腔长的变化极为灵敏,所以它又在传感器领域获得广泛的应用,环形腔陀螺就是一例。由于光纤环形腔的应用范围很广,许多研究者对环形腔的特性做了大量的研究工作,如环形腔的时域响应特性等^[6]。一个高分辨率的环形腔要实现高精细度还必需满足一些外部条件:首先光源的相干长度必需远大于环形腔的腔长,当用作扫描干涉仪时,其扫描速度不能太快^[7]。如果光源的相干长度小于环形腔腔长,它只是循环延迟线^[8]。如果光源的相干长度仅大于腔长,而不远大于腔长时,光源有限的相干长度使腔的有效精细度下降^[9]。

在本文中区分两个不同的环形腔精细度的概念:环形腔的极限精细度与有效精细度。

环形腔的极限精细度是指在不考虑光源的相干性影响时,或者说认为光源的相干长度为无穷大时的精细度,这就是以前的所谓环形腔(或法布里-珀罗腔)的精细度。对应的线宽称之为极限线宽,简称线宽。环形腔的有效精细度是指入射光的相干长度有限时,环形腔的自由光谱范围与测得线宽(有效线宽)的比。对无源环形腔,有效精细度总是小于(极限)精细度。这是因为实际光源的相干长度总是有限的。通常在实验中都采用很好稳频的单纵模激光作照明光源,使光源的相干长度对环形腔精细度的影响很小,因而忽略了光源的其它性质(如谱线线型分布)对环形腔特性的影响。本文主要讨论洛伦兹和高斯两种典型谱密度分布的光源对环形腔有效精细度(线宽)的影响,并给出有效精细度(线宽)与入射光线宽之间的定量关系。

2 光源的相干性对无源光纤环形腔的影响

考虑如图1所示的由单模光纤组成的环形腔。本文不考虑光纤的偏振特性,只讨论单一偏振态。设耦合器的固有损耗为 γ , 耦合系数为 K , 光纤的固有损耗系数为 α , 腔长为 L 。假设入射光波场的幅值是稳定的, 但有随机的相位波动(此假设对稳频单纵模激光是合理的)。光场表示为^[10]



$$E(t) = E_0 \exp \{ i[\omega_0 t + \varphi(t)] \} \quad (1)$$

E_0 为幅值常数, ω_0 为中心角频率, $\varphi(t)$ 为随机初相位, 它的自相关函数与激光的工作状态有关。设入射光从耦合器的 1 端口入射 $E_1(t) = E(t)$, $\tau = nL/C$ 为环程时间, n 为光纤的

Fig. 1 Schematic of an all-fiber ring resonator

折射率, C 为光速。

$$E_4(t) = iE_0 \sqrt{K(1-\gamma)} e^{-i[\omega_0 t + \varphi(t)]} + E_0(1-\gamma)(1-K) e^{-\alpha L} \sum_{n=0}^{\infty} (i \sqrt{K(1-\gamma)} e^{-\alpha L})^n e^{-i[\omega_0(t-n\tau) + \varphi(t-n\tau)]} \quad (2)$$

令 $C_p(\tau) = \langle e^{-i[\varphi(t) - \varphi(t-\tau)]} \rangle$, $\langle \rangle$ 表示时间均值, 则“4”端口输出的归一化光强

$$E I_4 = (1-\gamma) \left[1 - \frac{(1-K)(1-K_r)[1-KK_r C_p^2(\tau)]}{(1-KK_r) \{ [1 - \sqrt{KK_r} C_p(\tau)]^2 + 4 \sqrt{KK_r} C_p(\tau) \sin^2(\theta/2) \}} \right] \quad (3)$$

$$K_r = (1-\gamma) e^{-2\alpha L} \quad \theta = \omega_0 \tau + \pi/2 = \beta L + \pi/2$$

类似地可以求得腔内振荡光强 I_3

$$I_3 = \frac{(1-\gamma)(1-K)}{1-KK_r} \frac{1-KK_r C_p^2(\tau)}{[1 - \sqrt{KK_r} C_p(\tau)]^2 + 4 \sqrt{KK_r} C_p(\tau) \sin^2(\theta/2)} \quad (4)$$

由于 $\sin^2(\theta/2)$ 的变化非常快, 所以在高精度范围内, 可取环形腔的有效精细度

$$F_e = \pi [C_p(\tau) \sqrt{KK_r}]^{1/2} / [1 - C_p(\tau) \sqrt{KK_r}] \quad (5)$$

令: $K'_r = K_r C_p^2(\tau)$, 则 $F_e = \pi \sqrt{KK'_r} / (1 - \sqrt{KK'_r})$, 此式与不考虑光源相干长度影响时的公式形式完全一样^[3], 所以光源相干长度的影响与损耗的影响相似, 使环形腔的精细度下降。无源环形腔的有效精细度不仅与腔的损耗有关而且与入射光的相干长度有关, 从本质上说它由腔内光子的寿命决定。腔内损耗使腔内光强按负指数衰减, 腔内损耗增大对应着腔内光子寿命的缩短, 因而腔的有效精细度下降。所以在腔内插入光放大器的有源环形腔可以减小净损耗, 而使入射光子寿命的缩短相应减小, 从而达到提高有效精细度的目的。当然腔内放大器的增益应维持在增益小于腔的损耗, 否则将会自激形成激光。

3 光源的谱分布对无源光纤环形腔的有效精细度(线宽)的影响 为简单起见, 令 $K = K_r$, 由(5)式得

$$F_e = \pi \sqrt{K_r C_p(\tau) / [1 - K_r C_p(\tau)]} \tag{6}$$

当光源的谱分布为洛伦兹型时, 随机初相位的自相关量用 C_l 表示, 即令 $C_p = C_l$ 则

$$C_l = \langle e^{-i[\varphi(t) - \varphi(t-\tau)]} \rangle = e^{-\pi \Delta \nu \tau} = e^{-\pi \frac{\Delta \nu}{\Delta \nu_f} \tau} \tag{7}$$

$\Delta \nu$ 为入射激光的线宽, $\Delta \nu_f = 1/\tau$ 为无源光纤环形腔的自由光谱范围, 所以在考虑光源的相干长度影响后无源光纤环形腔的有效精细度 F_{el}

$$F_{el} = \pi \sqrt{K_r e^{-\pi \Delta \nu \tau} / \left[1 - K_r \exp \left[-\pi \frac{\Delta \nu}{\Delta \nu_f} \tau \right] \right]} \tag{8}$$

类似地, 当入射光源的谱密度分布为高斯线型时, 令 $C_l = C_g$

$$C_g = \exp \left[- \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\ln 2} \right)^2 \left(\frac{\Delta \nu}{\Delta \nu_f} \right)^2 \right] \tag{9}$$

设对应的有效精细度为

$$F_{eg} = \pi \sqrt{C_g K_r / (1 - C_g K_r)} \tag{10}$$

由(8)式和(10)式计算得 F_{el} 和 F_{eg} 随入射激光线宽的变化如图 2 所示。从图 2 可以看出: 无源光纤环形腔的精细度越高, 入射光的线宽对它的有效精细度的影响就越大。这一结果是完全合理的。因为无源腔的精细度越高, 它要求入射光的相干长度就越长, 线宽就越窄。对一给定线宽的入射光源, 腔精细度越高, 光源线宽与腔的极限线宽的比就越大, 与为了实现高精度所要求的光源线宽差得就越远, 所以影响就越大。在入射光线宽相同的情况下, 高斯型光源对有效精细度的影响比洛伦兹型要小些。为了更好地反映光源的谱分布对无源环形腔影响, 下面讨论腔的有效线宽与入射光线宽之间的关系:

令 $\Delta \nu_e$ 为环形腔有效线宽。则 $\Delta \nu_e = \Delta \nu_f / F_e$, 所以当入射光源为洛伦兹型时, 有效线宽用 $\Delta \nu_{el}$ 表示, 有

$$\frac{\Delta \nu_{el}}{\Delta \nu_f} = \frac{1 - K_r e^{-\pi \Delta \nu \tau}}{\pi \sqrt{K_r e^{-\pi \Delta \nu \tau}}} \tag{11}$$

同样地, 当入射光源为高斯型时, 用 $\Delta \nu_{eg}$ 表示:

$$\frac{\Delta \nu_{eg}}{\Delta \nu_f} = \frac{1 - K_r \exp \left[- \left(\frac{\pi \Delta \nu}{2 \Delta \nu_f \sqrt{\ln 2}} \right)^2 \right]}{\pi \sqrt{K_r \exp \left[- \left(\frac{\pi \Delta \nu}{2 \Delta \nu_f \sqrt{\ln 2}} \right)^2 \right]}} \tag{12}$$

(11) 式和(12)式就是光纤环形腔的有效线宽与入射光线宽之间的定量关系。入射光源的线宽与腔的有效线宽之间的关系曲线如图 3 所示。从图 3 可见, 对洛伦兹线型的入射光源, 有效线宽总是大于入射光的线宽, 有效线宽与入射光线宽之间的关系满足(11)式; 然而对高斯型,

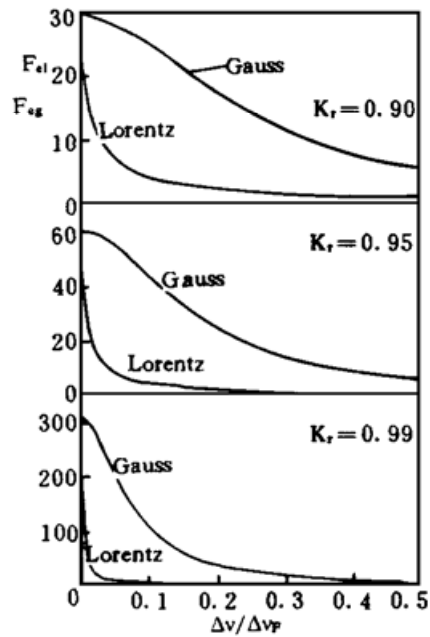


Fig. 2 Degradation of the finesse as a function of $\Delta \nu / \Delta \nu_f$

在入射光线宽大于环形腔的极限线宽时,有效线宽可以小于入射光的线宽,有效线宽与入射光线宽之间的关系则由(12)式给出。这两种线型的差别是因为它们的相干时间与线宽之间的关系不同。对高斯型光源,线宽 $\Delta\nu$ 与相干时间 Δt 之间的关系^[11]为: $\Delta t = \sqrt{(2 \ln 2 / \pi) / \Delta\nu} = 0.664 / \Delta\nu$;而对洛伦兹型,则有: $\Delta t = 0.318 / \Delta\nu$ 。图4给出了环形腔有效线宽与耦合器的最佳耦合比 K_r 之间的关系:有效线宽随着环形腔精细度的上升近似线性地下降,但洛伦兹型下降的速率比高斯型稍大些。上述结果共同点是洛伦兹型对环形腔有效精细度的影响比高斯型大得多。

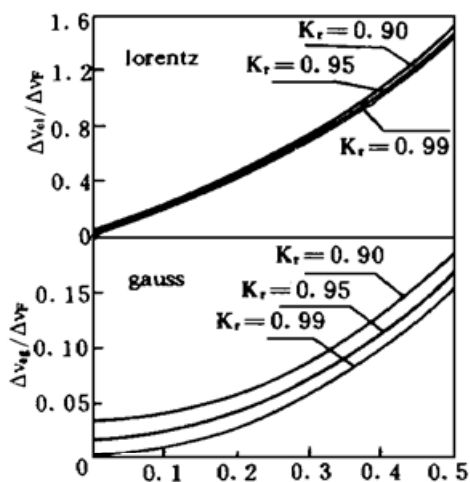


Fig. 3 The relative effective linewidth as a function of $\Delta\nu / \Delta\nu_p$

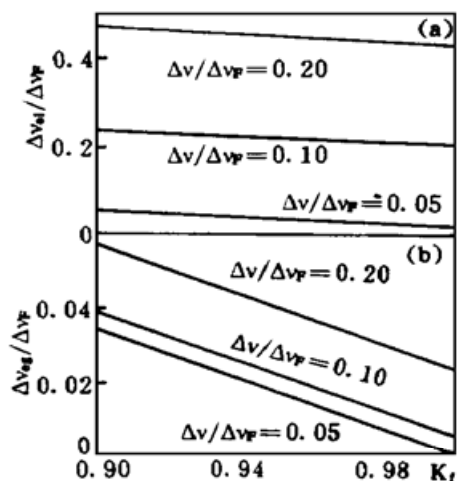


Fig. 4 The relative effective linewidth as a function of K_r . (a) Lorentz; (b) Gauss

结 论 光源的谱分布和线宽对环形腔有效精细度的影响是因为环形腔的工作原理是多光束干涉。有效线宽的倒数就是环形腔内的光子寿命。有效线宽不仅与腔的损耗有关,而且与入射光的相干性和谱分布有关。本文得到了入射光为两种典型谱分布(洛伦兹和高斯)时,光纤环形腔的有效精细度(线宽)与入射光线宽之间的定量关系。分析表明:洛伦兹型光源对有效精细度(线宽)的影响比高斯型大得多,而且对洛伦兹型入射光,有效线宽总是大于入射光的线宽;对高斯型,在入射光线宽大于环形腔的极限线宽时,有效线宽可以小于入射光的线宽。

参 考 文 献

- [1] L. F. Stokes, M. Chodorow, H. J. Shaw, All-single mode fiber resonator. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6): 288~290
- [2] C. Y. Yue, J. D. Peng, B. K. Chou, Fiber ring resonator with finesse of 1260. *Electron Lett.*, 1988, **24**(10): 622~623
- [3] K. Kalli, D. A. Jackson, Ring resonator optical spectrum analyzer with 20 kHz resolution. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(15): 1090~1092
- [4] K. Kalli, D. A. Jackson, Tunable fiber frequency shifter that uses an all-fiber ring resonator. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(17): 1243~1245
- [5] Haruo. Okamura, Katsumi Iwatsuki., A finesse-enhanced Er-doped fiber ring resonator. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(11): 1554~1560
- [6] David R. Huber, James B. Carroll., Time domain response of an optical frequency swept F-P interferometer. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(14): 2386~2390
- [7] Kevin Hsu, Clvin M. Miller, Jeff W. Miller., Speed-of-light effects in high resolution long cavity fiber F-P scanning interferometer. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3): 235~237

- [8] Moshe Tur, Behzad Moshehi, J. W. Goodman, Theory of laser phase noise in recirculating fiber optic delay lines. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(1): 20~ 30
- [9] Yoshihiro Ohtsuka, Optical coherence effects on a fiber-sensing F-P interferometer. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(23): 4316~ 4320
- [10] F. T. Arechi, Measurement of the statistical distribution of Gaussian and laser source. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **15**(4): 912~ 915
- [11] J. W. Goodman 著, 统计光学, 秦克诚等译, 北京, 科学出版社, 1992: 151~ 154

Light Source Effects on Effective Fineness of a Fiber-Optic Ring Resonator

Hu Zongfu Qian Jingren

(*University of Science and Technology of China, Department of Electric Engineering and Information Science, Hefei 230026*)

Shen Huiming

(*Hefei University of Technology, Department of Computer and information, Hefei 230009*)

(Received 11 February 1996; revised 13 May 1996)

Abstract The effect of the coherence and spectrum distribution of input light on the effective fineness (linewidth) of a fiber-optic ring resonator is discussed in this paper. For two typical spectrum distribution, Gauss and Lorentz, the quantitative relation between input light linewidth and the effective linewidth of the ring resonator is given. The analytic results show that the effect of input light with Lorentian spectrum distribution on the effective fineness is greater than that of Gaussian. For Lorentian light source, the effective linewidth is always greater than that of the input light.

Key words Fiber-optic ring resonator, effective fineness (linewidth).